

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630021

研究課題名(和文)CFRPの高速曲線切断を可能とする丸のこ切削の開発

研究課題名(英文)Development of a circular sawing machine to enable the high-speed curved-line cutting of CFRP

研究代表者

笹原 弘之 (Sasahara, Hiroyuki)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00205882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、本来直線切断に用いられる丸のこを、椀状にたわませてCFRP(炭素繊維複合プラスチック)を高速で曲線切断する新加工法および加工機の開発を行った。その上で、連続多刃の丸のこによる曲線切断における加工メカニズムを明らかにし、任意の曲線を切断するために必要な「湾曲の曲率」と「丸のこの移動軌跡」との制御手法を開発した。のこ刃形式によるCFRPの切削においてデラミネーションやファイバアウト、工具寿命について調査し、丸のこ切削によりCFRPの高品位加工が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：A new process for a curved line cutting of CFRP (carbon fiber reinforced plastics) plate and a machine tool for this purpose were developed in this work. A circular saw is deflected like a bowl-like shape and then a curved line can therefore be cut without interference between cutter body and machined surface. Then the cutting mechanism during the curved line cutting using a circular saw with large number of cutting edges were clarified. In addition, a procedures to control the amount of the deflection of the saw body and to control the moving trajectory of the cutting point in order to realize a free-form curved line cutting were developed. As a result of the experiment on the delamination, fiber out and tool wear, a high quality cutting of CFRP plate can be realized with the developed circular saw cutting.

研究分野：生産工学

キーワード：機械工作・生産工学 切削加工 CFRP 丸のこ

### 1. 研究開始当初の背景

航空機を中心に CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の利用が増加している。航空機部材などの大型 CFRP 製品は熱硬化性樹脂を含浸した炭素繊維のシート(プリプレグ)を積層し焼成するが、外周部の形状精度・寸法精度を確保するために、外縁を削り落とすトリミング加工が必要となる。エンドミルによる切削加工やアプレシブ・ウォータージェット加工が主流であるが、前者では高強度のCFRPの難削性のために工具摩耗が激しく加工速度も低い。また後者では加工面の形状精度や砥粒の再利用などに問題を抱える。レーザー加工や放電加工も可能ではあるが、実用に供するには加工速度の大幅な向上が必要である。したがって、画期的に CFRP を高速に加工可能な加工方法が求められていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、本来直線切断に用いられる丸のこを、椀状にたわませて CFRP (炭素繊維複合プラスチック) を高速で曲線切断する新加工法および加工機の開発を行う。この方法によれば、現在主流であるエンドミルやアプレシブウォータージェット加工に比して飛躍的に高効率な切断が可能となり、生産工学・加工学分野のイノベーションにつながるが見込まれる。その上で、連続多刃の丸のこによる曲線切断における加工メカニズムを明らかにし、任意の曲線を切断するために必要な「湾曲の曲率」と「丸のこの移動軌跡」との制御手法を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

丸のこを湾曲させて曲線を切断するアイデアを具現化するために、曲線切断丸のこ専用小型加工機と、加工に適した湾曲丸のこの開発を行う。さらに、任意の曲線をこの台金と切断面が干渉なく切断するための、この「湾曲状態」と「移動軌跡」「のこ姿勢」の制御方法の開発を行う。また、CFRP の切断を目的としているため、丸のこによる CFRP の切削性能を明らかにする切削試験を行う。以上を総合して、設定した自由曲線に対し、NC プログラムを生成し実際に切断加工が可能なシステムを構築する。

### 4. 研究成果

#### (1) 曲線切断丸のこ専用小型加工機の開発

曲線切断丸のこは、曲率半径が大きいほど実現は容易であるが、のこ刃の径、厚みを変更することにより、比較的曲率半径の小さい自動車部品や樹脂製品、木材などに適用できると期待される。そこで小型の曲線切断丸のこ加工機を開発した。

図1に開発した曲線切断丸のこ専用の加工機を示す。のこ刃の直径は 50 mm で R200 mm 程度の曲率半径まで加工可能である。X 軸、Y 軸の直進軸、図2に示すのこ刃の湾曲状態を

制御する U 軸、工具を Z 軸まわりに回転する回転軸 C 軸、さらに、切断面の角度を可変とするための工具傾斜軸 B 軸を有する構成となっている。

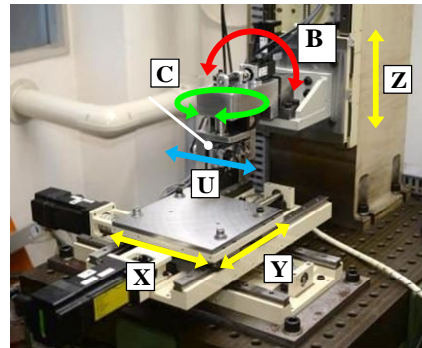


図1 曲線切断丸のこ専用小型加工機

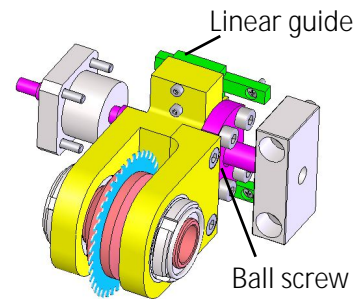


図2 丸のこの湾曲制御に用いる U 軸動作

#### (2) 曲線切断に適した丸のこの開発

曲線切断丸のこが加工可能な最小の曲率半径は加工断面長と最大たわみによって決定される。加工断面長は、のこ刃の直径に依存し、直径が小さいほどその加工断面長が短くなるため、最小の曲率半径が小さくなる。しかし直径の減少に比例して加工できる被削材の板厚が薄くなる。また刃数や切れ刃形状が制限されるなどの問題点があるため、目標の板厚を 3~5mm、刃数を 20 枚に設定し、それに適する直径である 50mm とした。のこ刃の台金厚さは CFRP を加工可能な剛性を確保できる 0.5mm とした。

のこ刃にスリットを入れることによって、より大きくたわませられることができる。最適なスリット形状をいくつか仮定し、そのなかから最適なものを選定した。その外観を図3に示す。

このスリットを設けることにより、より小さな曲率半径を加工可能となった。通常このこ刃は強制変位 1mm で塑性変形し、最小の曲率半径は R384mm となった。一方、スリット入りのこのこ刃は 1.3mm で塑性変形し、最小の曲率半径は R205mm となった。

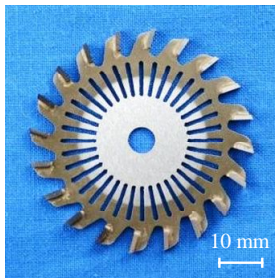


図 3 小径丸のこ

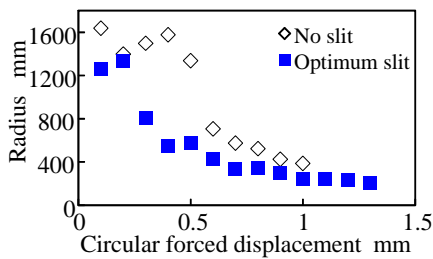


図 4 スリットの有無と湾曲の曲率半径

(3) 任意の曲線を切断するための、この湾曲状態と移動軌跡の制御方法

丸のこには通常、台金と被削材の摩擦を防ぐためにあさりが存在する．図 5 (a) に示すように切れ刃の幅は台金の厚さより大である．その差の範囲内であれば同図 (b) に示すように自由にたわませることができる．同図 (c) のように目標形状を微小区間に分割し、区間ごとにあさりの範囲内でたわみとこの刃の姿勢を決定し、直線補間で移動させることにより連続加工が可能になる．具体的には、

- (a) 微小距離  $L$  進んだ位置の目標曲線上に先行刃の位置を決める．
- (b) 加工面 A・B の範囲内 (あさりの範囲内) にこの刃の中心点を求める．また、そして先行刃が  $L$  進んだ位置において目標曲線に正接し、かつ中心点を通る円弧を求める．
- (c) この刃を直線補間によって進めながら (b) で求めた円弧と一致するようにこの刃たわみと工具を回転させ姿勢を変える．

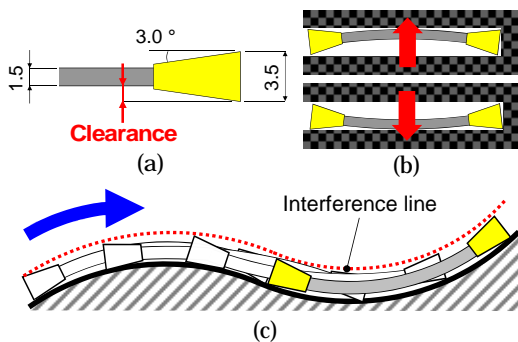


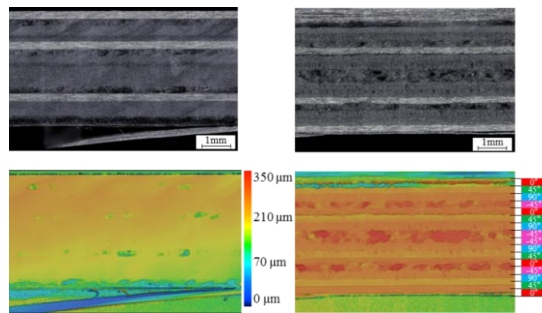
図 5 任意の曲線経路での切断

用いるのこの刃の寸法、材質などによって加工できる最小の曲率半径に制限が存在するが、以上の (a) ~ (c) の手順を繰り返すことにより、その範囲内で任意の曲線に対し容易に適用可能である．

(4) 加工面特性

レーザー顕微鏡により観察した 16 パス切削後 (切削距離 2400mm) の加工面の様子を図 6 に示す．なお、ここでは直径 305mm の丸のこを用いている．丸のこによる加工面はエンドミルと比べて凹凸が小さく平坦で良好な加工面であることがわかる．しかし、加工面にカッターマーク、下面部にはデラミネーションが確認できる．カッターマークの発生はこの刃の横振れが原因だと考えられる．工具摩耗が進行し切れ刃の切れ味が悪化すると、切削力はこの刃半径方向成分が大きくなり、この刃台金が面外方向に弾性変形する．この変形がこの刃の横振れであり、面外方向の力である  $F_y$  成分の切削力が加工面性状に影響を与えると考えられる．

一方、エンドミルの加工面は、同図 (b) 下のコンター図より、炭素繊維配向方向ごとに高さが異なっていることがわかる．これは切れ刃の摩耗速度が炭素繊維配向角によって異なるため、エンドミル刃先が波状に摩耗することが原因であると考えられる．また、 $-45^\circ$  の炭素繊維層にむしれが確認できる．これは、炭素繊維配向方向と切削方向の関係により、切削形態が異なるためである．また、エンドミルの刃先が摩耗し、切れ味が悪化したことにより正常な切削が行われなくなったことも要因であると考えられる．



(a) 丸のこ (b) エンドミル

図 6 切削面の比較

(5) 工具摩耗

図 7 に 16 パス切断後 (切削距離 2400mm) における、丸のこの切れ刃横逃げ面の様子を示す．同図左はマイクロスコブによる写真、同図右はレーザー顕微鏡による拡大写真である．拡大写真において刃先が摩耗し丸みを帯びていることが確認できる．

一方、エンドミルの第一逃げ面の様子を図 8 に示す．逃げ面が波打つように摩耗していることが確認できる．CFRP は板厚方向に配



向角が異なる炭素繊維が積層されているが、エンドミルによる CFRP 加工は同一の切れ刃部分が毎回転同じ炭素繊維層を切削する。摩耗速度は炭素繊維配向角に依存するため、炭素繊維層毎に摩耗の進行も異なり、刃先が波状に摩耗したと考えられる。一方、丸のこは炭素繊維層の板厚方向に繊維層を横切って切削し、特定の配向の繊維のみを切削するのではないので、横逃げ面は均一に摩耗している。

図9にエンドミルの第一逃げ面と丸のこの横逃げ面の摩耗幅を示す。丸のこはエンドミルと比べて、工具摩耗速度が低く、工具寿命が長いことがわかる。エンドミルの摩耗幅は切削距離 2400mm において  $104\mu\text{m}$  であるのに対し、丸のこは  $50\mu\text{m}$  と半分以下の値となっている。本研究では、エンドミル加工の3倍の切削距離 7200 mm まで切断を行ったが、 $66.7\mu\text{m}$  とエンドミルと比べて工具摩耗が小さいことがわかる。これは、繊維配向角の違いによる工具摩耗速度の影響が小さいことによるためであると考えられる。また、エンドミルと比べ、丸のこは切れ刃が多く工具摩耗が分散したためであると考えられる。

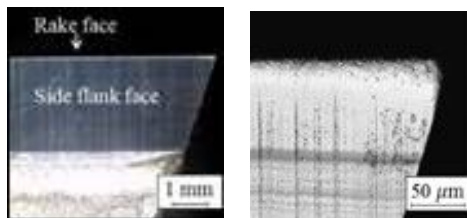


図7 丸のこの横逃げ面

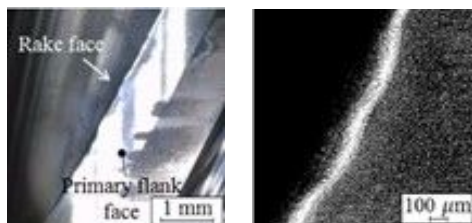


図8 エンドミルの第一逃げ面

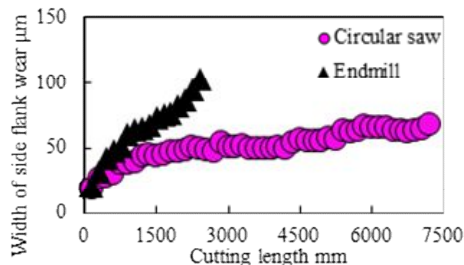
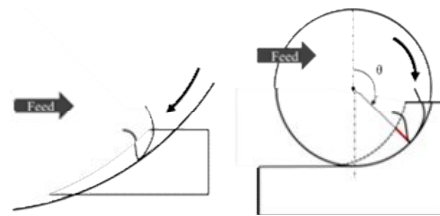


図9 逃げ面摩耗の推移



(a) 丸のこ (b) エンドミル

図10 切削様式の違い

また、丸のこの工具摩耗が小さいことは、丸のことエンドミルの両者の切削状態の違いにも起因している。図10に切り取り厚さの違いを示す。丸のこは直径が大きくほぼ一定の切り取り厚さを維持するのに対し、エンドミルは  $\theta = 180^\circ$  付近において切り取り厚さが 0 となり、切削が行われずに刃先が加工面上を滑りするため、エンドミルの工具摩耗が進行しやすいと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 5 件)

笹原弘之、助川悠、山田洋平、楠富達仁、丸のこによる CFRP 切断時の加工面特性と工具損傷、2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会、2015.9.4 ~ 2015.9.6、東北大学(宮城県・仙台市)。

山田洋平、楠富達仁、笹原弘之、小径曲線切断丸のこの開発、日本機械学会第 10 回生産加工・工作機械部門講演会、2014.11.15、徳島大学(徳島県・徳島市)。

山田洋平、楠富達仁、笹原弘之、曲線切断丸のこの加工断面傾斜制御、2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会、2014.9.16、鳥取大学(鳥取県・鳥取市)。

Yohei Yamada and Hiroyuki Sasahara, Development of Multi-Axis Micro Sawing Machine for Free-Form Curves Cutting Using Flexible Circular Saw, 15th ICPE 2014.7.23 ~ 2014.7.25, Hotel Nikko Kanazawa (Kanazawa · Ishikawa)

Yohei Yamada and Hiroyuki Sasahara, Curved-line cutting using flexible circular saw, 14th Int. Conf. EUSPEN, 2014.6.2 ~ 2014.6.6, Dubrovnik (Croatia)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://web.tuat.ac.jp/~saslab/>

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

笹原 弘之 (SASAHARA, Hiroyuki)  
東京農工大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：00205882

### (2)研究協力者

山田 洋平 (YAMADA, Yohei)